

陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究

池 野 正 明*・田 中 寛 好**

本研究では、貯水部のゲート開放により津波を発生させた実験を行い、陸上敷地に設置された建屋に津波に伴う漂流物が衝突する場合を想定し、津波波力、各種形状漂流物（横向きと縦向き配置の円柱と角柱、球）の運動と衝突力との関係、衝突時の付加質量係数等を検討した。その結果、まず、砕波を伴う陸上遡上段波の静水面付近の最大波圧は過去の実験結果を上回ることがあり、波圧算定式を提案した。つぎに、衝突時の付加質量係数は、漂流物の形状や運動特性の違いにより異なることがわかった。付加質量係数を取り込み、各種形状漂流物に適用できる衝突力算定式を提案した。

1. はじめに

陸上敷地内に津波が遡上浸入すると、敷地内の自動車や材木等が漂流し、津波とともに敷地内建屋や陸上構造物に衝突する恐れがある。津波漂流物の衝突力に関する研究として、松富 (1999) の円柱縦向き衝突を対象とした研究例があるものの、陸上遡上津波を対象に、上記以外の漂流物による衝突力を検討した例は少ない。そこで、本研究では、貯水部のゲート開放により津波を発生させた実験を行い、陸上敷地内構造物に津波に伴う漂流物が衝突する場合を想定し、津波波力、各種形状漂流物の運動と衝突力との関係、衝突時の付加質量係数等を検討する。これに基づき、陸上遡上津波と漂流物による衝突力の算定式を提案する。

2. 実 験

(1) 漂流物模型

漂流物模型の材質として、喫水深が物体高さの半分程度となるように木材を使用した。漂流物の形状を円柱、角柱(断面正方形)、球の 3 種類とし、 L/D : 円柱の場合、長さ/直径; 角柱の場合、長さ/断面正方形辺長を 1.3~30 に変化させ、 D を 2.6~8 cm (重量 0.588~29.792 N) に変化させた。ただし、球については D を 6.3~14 cm (重量 0.784~6.468 N) に変化させた。また、漂流物の形状の違いによる運動や衝突形態の差異を調べるため、各形状間で重量が同じになるケースも実施した。

(2) 実験装置および実験条件

図-1 に実験装置を示す。模型縮尺を 1/100 相当とし、中央のゲート下流側水域の背後に高さ 10 cm の陸上敷地部を設け、その上に設置した受波圧板を陸上構造物と想定し、上記各種形状漂流物を、受波圧板前面から 80 cm 離れた位置に縦向き（漂流物の長軸方向が受波圧板に垂直）、および横向き（長軸が受波圧板に平行横置き）に配置し、漂流物の運動や衝突状況を調べた。貯水部の静水位 H_1 を 20~60 cm、下流側水域の静水位 H_2 を 5~10 cm

に変化させ、ゲート引き上げ急開により段波を発生させた。

(3) 波圧および衝突力の測定

ゲート下流側 3.84 m の地点に設けた受波圧板に半導体式小型波圧計（定格容量 0.0098 MPa）を配置し計 14 地点の波圧分布を計測した。また、受波圧板の背後に取り付けた 2 対の鋼鉄製 L 型力測板の鉛直部材に至ゲージを配置し 6 点の歪を波圧計と同時計測し、異なる鉛直点で同時計測された 2 歪データの差から圧縮伸張歪を消去して曲げ歪のみを算出し鋼鉄の弾性係数 (9.8×10^4 MPa) と部材の断面係数を乗じて、曲げモーメント、作用点、水平力を算定した。漂流物が無い津波のみの場合の上記水平力と波圧計による鉛直分布の積分値とを比較し水平合力をクロスチェックしたところ、両者はよく一致していた。

曲げ歪みの方が圧縮歪よりもかなり大きいため、出力電圧を拡大して計測する必要がなく衝突力の測定精度が向上した。

(4) 漂流物運動の測定

図-1 の実験装置の正面ガラスより 3.45 m 水平に（手前に）離れた位置に高解像度デジタルビデオカメラを設置し、図-1 の (X, Z) 座標で (80 cm, 40 cm) の位置を焦点として、漂流物の動きを撮影した。実験装置の正面ガラスから背面壁までの奥行は 90 cm であるが、この背面壁（背景）を黒色とし、漂流物追跡時の (X, Z) 座標キャリブレーション用白色マーカーを 10 cm 格子間隔で下流側水域の背面壁全体に記入した。漂流物を構成する各面を異なる 5 色に着色し、これらをマーカーとしてカメラで認識させ、ゲート開放後の段波による漂流物各マーカーの運動を 1/60 s 毎に撮影した。マーカーの動きがカメラで認識しやすいように水路正面ガラス側近くに漂流物を配置した。漂流物マーカーと背景のキャリブレーション用マーカーとの奥行き方向の相対距離は最大で 90 cm になるが、撮影時の投影面位置の違いにより、漂流物マーカーの (X, Z) 座標に歪が生じる。このため、漂流物計測データをキャリブレーション用マーカーの投影面位置へ座標変換することにより歪を補正した。この

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 流体科学部

ようにして得られた漂流物の変位データを時間微分して、衝突直前・直後の水平・鉛直速度を算定した。

(5) 水位、流速の測定

漂流物模型が無い場合の陸上域とゲート下流側水域(図-1中、 $X=1,80,171,275$ cmの4点)に容量式波高計と鉛直2次元電磁流速計を設置し、水位と流速を計測した。なお、水位、流速、波圧、衝突力はデジタルデータレコーダーで同時計測し、サンプリング周波数と時間は1 kHzと10 sとした。

3. 実験結果と考察

(1) 陸上遡上段波の波圧と漂流物の衝突力波形

ゲート下流側水域、陸上域の各地点で計測した遡上段波($H_1=40$ cm, $H_2=5$ cmの場合)の水位時間波形例を、図-2の左図に示す。陸上の受波圧板へ衝突時の各鉛直高さにおける波圧の時間波形例を、図-2の右図に示す。図-2によると、段波は遡上に伴い碎波して陸上部へ浸入し、受波圧板に衝撃的に衝突し($t=1.75$ s)、その後、重複波となって受波圧板前面で大きな水位上昇が生じている。この段波は、主に陸上敷地部から5 cmの受波圧板高さに衝突している。

図-3に、円柱と角柱を横向き、円柱を縦向きに配置した場合の段波($H_1=40$ cm, $H_2=10$ cmの場合)と漂流物衝突力の時間波形例を示す。図には、漂流物が無い場合の水平波力も示しているが、両者は同期計測していない。ここで、横向き配置の場合の円柱と角柱は同程度の重量となっている。まず、横向き配置の場合の円柱と角柱の衝突力波形によると、漂流物は段波の先端部によって運ばれ、段波よりやや早めかほぼ同時に受波圧板に衝突している。さらに、同程度の重量の円柱と角柱の場合、角柱の衝突力の方が円柱の衝突力よりも大きくなっている。これは、陸上遡上段波が円柱の下部を通過する際、円柱が回転しやすく回転しながら陸上部を移動し円柱周辺に遡上波を巻き込んで衝突するのに対し、角柱は回転せずと並進移動する。このため、遡上波が角柱下部を通過しにくく角柱の上を乗り越えにくくなり、角柱を背後から押しながらか衝突する。衝突時に角柱背後の段波水塊が角柱と一体となり、みかけの質量が増大しているものと推察される。つぎに、円柱の横向きと縦向き配置の場合とを比較すると、縦向き配置の方が円柱長さが短く重量が軽いにも係わらず、段波の衝突後に円柱が衝突しており、衝突のタイミングが横向きの場合よりも遅くなっている。これは、縦向き配置の方が横向き配置よりも受波力面積が小さいため、円柱の移動速度が横向き配置よりも遅いためであると推察される。また、同程度の重量の円柱と角柱を縦向き配置した場合の衝突力に顕著な違いは生じなかった。また、球の場合、円柱縦向き配置の

場合と同様に受波力面積が小さいため、移動速度が遅く大きな衝突力が発生しなかった。

(2) 漂流物の運動変位と衝突時速度

図-4に、角柱を横向き配置した場合の重心位置の運動の断面2次元履歴と水平・鉛直速度の時間波形の代表例を示す。角柱は(X_0, Z_0)=(80 cm, 2.3 cm)の位置から遡上段波によりほぼ水平方向に運ばれて衝突し、衝突後は上方に打ち上げられ、反射波とともに上流側へ戻っていく様子がわかる。角柱衝突直前($t=1.75$ s)には、2.5 m/s程度の水平移動速度が生じている。

図-5は、水位波形の位相差から求めた陸上遡上段波の波速と各種形状漂流物の衝突直前の水平移動速度との関係を示したものである。縦横軸はDとLで無次元化している。図には、陸上部の無いゲート下流側水域内に漂流物を配置した過去の実験結果(池野ら, 2001)も併記している。図-5によると、陸上部に円柱と角柱を横向き配置した場合には、段波先端部によって運ばれるため、過去の実験結果と同様に、段波の波速と同程度の水平移動速度が生じている。このため、漂流物は段波よりやや早めかほぼ同時に衝突する。これに対し、円柱を縦向き配置した場合や球の場合には、移動速度が段波の波速よりも遅くなっている。これは、段波の衝突途中や衝突後に漂流物が衝突することを意味する。これが原因となり、この種の漂流物は、他の漂流物に比べ大きな衝突力が生じにくくなっている。円柱縦向き配置の場合、回転せずと並進移動し、球の場合、回転しながら移動していた。

(3) 各種形状漂流物の衝突時付加質量係数

松富(1999)にならい、図-3に示した衝突力波形のうち漂流物の衝突力波形のみを抽出し、その作用時間と最大衝突力とから衝突力波形の三角形分布を仮定して力積を求め、これが衝突前後でみかけの付加質量を含む漂流物の運動量変化に寄与すると仮定して、各種形状漂流物の付加質量係数を算定した。図-6に、支配パラメーター $V_H/(g^{0.5}D^{0.25}L^{0.25})$ (池野ら, 2001)と付加質量係数 C_{MA} との関係を示す。

図によると、まず、円柱横向きの場合では、断面2次元現象とみなせる場合(円柱長さが水路奥行幅90 cmに近い場合)、 $C_{MA} \approx 2.0$ 、3次元現象とみなせる場合(円柱長さが水路奥行幅よりかなり短い場合)、 $C_{MA} \approx 1.5$ となる。

一方、角柱横向きの場合では、断面2次元現象とみなせる場合、 $C_{MA} \approx 2.0 \sim 4.0$ となり、支配パラメーターに比例して大きくなる。3次元現象とみなせる場合、円柱横向きと同様に $C_{MA} \approx 1.5$ となる。これは、前節で考察したように、円柱は遡上段波により回転しながら移動するのに対し、角柱は回転せずに移動するため、断面2次元性が強い程、背後から迫る段波が角柱により多くせき止め

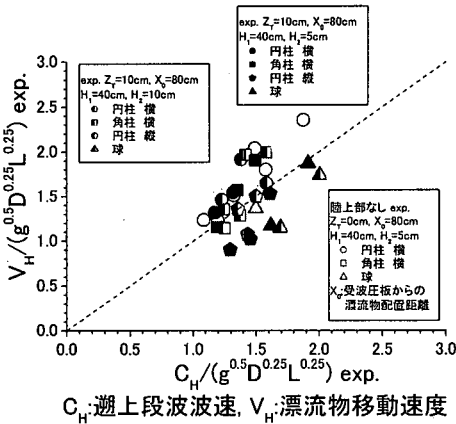


図-5 陸上遡上段波の波速と各種漂流物の移動速度との関係

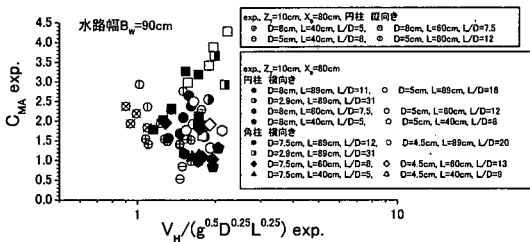


図-6 支配パラメータと各種漂流物の付加質量係数との関係

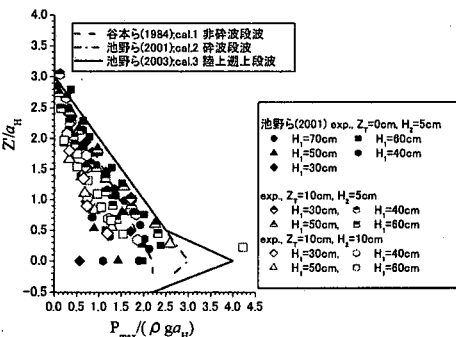
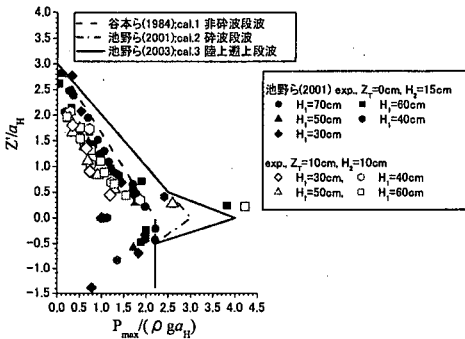


図-7 陸上遡上段波の波圧分布の特性

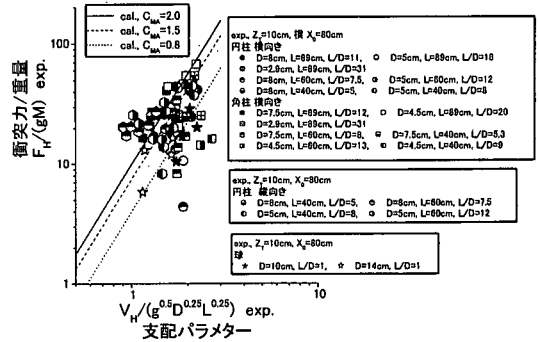


図-8 支配パラメータと各種漂流物の無次元衝突力との関係

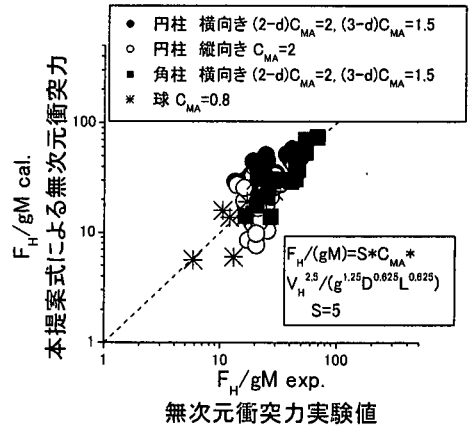


図-9 本提案式の各種漂流物の衝突力への適用性

られ、背後の段波水塊が角柱と一体となって衝突することにより、付加質量係数が円柱よりも増加したものと推察される。

つぎに、円柱縦向きの場合、概して $C_{MA} \approx 2.0$ 程度であるが、若干ばらついている。図は省略するが、球の場合、 $C_{MA} \approx 0.8$ 程度と推定される。

4. 陸上遡上段波の波圧と漂流物の衝突力算定式の提案

(1) 陸上遡上段波の波圧分布特性と算定式

図-7に、陸上遡上段波の波圧の鉛直分布を示す。図には、陸上遡上しない碎波段波の実験結果(池野ら, 2001)も併記している。また、非碎波段波(cal. 1: 谷本ら, 1984), 碎波段波(cal. 2: 池野ら, 2001)の波圧分布算定式も示している。図によると、陸上遡上段波について、特に静水面付近の波圧値が上記2種類の算定式や陸上遡上しない実験結果を上回る場合があることがわかる。そこで、実験結果に基づき、陸上遡上段波の波圧算定式を次式で提案し、図中に示す(cal. 3)。

$$p_m(z') / \rho g \alpha_H = 3 - z' / \alpha_H \quad (0.5 \leq z' / \alpha_H \leq 3) \quad \cdots (1)$$

$$p_m(z')/\rho g a_H = 4 - 3z'/a_H \quad (0 \leq z'/a_H \leq 0.5) \cdots (2)$$

$$p_m(z')/\rho g a_H = 4 + 3.6z'/a_H \quad (-0.5 \leq z'/a_H \leq 0) \cdots (3)$$

$$p_m(z')/\rho g a_H = 2.2 \quad (z'/a_H \leq 0.5) \quad (\text{池野ら, 1998a}) \cdots (4)$$

ここに、 p_m は最大波圧、 z' は静水面上向き正の座標、 a_H は進行波段波振幅、 ρ は流体密度、 g は重力加速度である。

図によると、新しい波圧算定式は、静水面付近で横軸最大値 4.0 を示す実験結果を評価できる。

(2) 各種形状漂流物の衝突力特性と算定式

図-8 に、支配パラメータ $V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})$ と無次元最大衝突力との関係を示す。図によれば、過去の実験結果 (池野ら, 2001) と同様に、無次元最大衝突力と支配パラメータとは相関関係にあるが、漂流物の形状、配置の向き等によって衝突力のばらつきが大きく、同一の相関パラメータでは各種形状の漂流物衝突力を表現できないことがわかる。そこで、前節での検討結果を基に、漂流物の形状や配置により付加質量係数 C_{AM} の値を変えて、算定式中に取り込み、衝突力算定式を次式で提案する。

$$F_H/(gM) = S \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5} \cdots (5)$$

ここに、 S は係数で 5.0、 C_{MA} は円柱横向き、縦向き、角柱横向き、球に対応した付加質量係数である。

図-9 に、本衝突力算定式の各種漂流物への適用性を示す。図によると、本衝突力算定式は各種漂流物の衝突力を概ね再現している。

5. 結 論

1) 砕波を伴う陸上遡上段波の静水面付近の最大波圧は陸上部が無い場合の過去の実験結果 (池野ら, 2001) を

上回ることがある。この場合の波圧算定式を提案した。

2) 各種形状漂流物 (横向きと縦向き配置の円柱と角柱、球) 衝突時の付加質量係数は、漂流物の形状や運動特性の違いにより異なる。

3) 上記付加質量係数を取り込み、各種形状漂流物に適用できる衝突力算定式を提案した。

謝辞：本研究を遂行するに当り、(株)シーアールエスの山田秀樹氏、森谷一広氏の協力を得たことを付記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則 (2000): 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻 (2), pp. 911-915.
- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998a): ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻 (1), pp. 366-370.
- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998b): 無ひずみ実験に基づくソリトン分裂津波の発生条件・防波堤波圧の評価, 電力中央研究所報告, 研究報告 U 98006.
- 池野正明・森 信人・田中寛好 (2001): 砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 48 巻 (2), pp. 846-850.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 3-29.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984): 1983 年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962a): 津波の研究 (I) 一段波津波の波速について一, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 44-49.
- 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄 (1962b): 津波の研究 (II) 一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
- 松富秀夫 (1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
- Asakura, R., K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002): The tsunami wave force acting on land structures, Proc. the 28 th ICCE, pp. 1191-1202.